

电压反转极性对温度梯度场下 聚乙烯内空间电荷的影响

陈曦, 王霞, 吴锴, 彭宗仁, 成永红

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 基于电声脉冲空间电荷测量方法, 测量了聚乙烯片状试样在常温($\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)及温度梯度($\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)下、不同电压极性($\pm 50\text{ MV/m}$)作用 2 h 过程中聚乙烯内的电荷积聚和场强分布特性, 同时测量了加压 2 h 后不同反转极性对温度梯度场下聚乙烯内电荷积聚和瞬态电场的影响. 结果表明: 无论反转极性如何, 最大瞬态电场畸变率近似相同; 电压极性从正到负反转过程中, 最大瞬态电场出现在高温侧, 而从负到正反转过程中, 最大瞬态电场出现在低温侧; 电压极性从正到负反转达到最大瞬态电场所需的时间更短.

关键词: 温度梯度; 反转极性; 聚乙烯; 空间电荷; 瞬态电场

中图分类号: TM215.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)10-0054-05

Effect of Voltage Reverse Polarity on Space Charge in Polyethylene under Temperature Gradient

CHEN Xi, WANG Xia, WU Kai, PENG Zongren, CHENG Yonghong

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: By using pulse-electro-acoustic space charge measurement method, space charge accumulation and field distribution of polyethylene (PE) films were measured respectively at room temperature ($\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$) and under temperature gradient ($\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$), when positive or negative DC of 50 MV/m was applied for 2 h. And the space charge profiles and field distributions under temperature gradient were investigated during the different reverse polarity. The tests show that the maximal field enhancement factor remains almost unchanged whatever the reverse polarity is. The maximal transient field appears near the high temperature side during voltage polarity reversal from positive to negative but near the low temperature side during voltage polarity reversal from negative to positive, and the spent period gets shorter to reach the maximum during polarity reversal from positive to negative than during the opposite reversal.

Keywords: temperature gradient; reverse polarity; polyethylene; space charge; transient field

直流输电因其高可靠性、低损耗、易维护及适用于远距离输电等优点已成为我国超高压直流电网的重要研究课题. 在直流电场作用下, 绝缘材料中容易形成空间电荷, 空间电荷会使得电场分布发生畸变, 促使老化, 且直流电场下聚合物体积电导率对温度

的依赖性及空间电荷的积聚效应, 都会导致高压直流塑料电缆的发展远落后于交流电缆^[1]. 众所周知, 直流电压下聚合物绝缘的场强分布正比于绝缘电阻率, 而绝缘电阻率随温度升高呈指数下降. 电缆在运行过程中发热引起的温度梯度效应, 将造成绝缘电

阻的梯度分布,使得电缆内场强也是梯度分布,并且直流下的空间电荷效应将进一步加剧场强的梯度分布.目前,对于温度梯度场下聚乙烯绝缘材料内的电荷积聚和场强畸变现象国内外已经展开了相应的研究,结果均表明,温度梯度效应将加剧绝缘低温侧场强畸变^[2-3].

在实际电缆运行中,经常为改变能量传输方向而改变电压工作极性.电缆中的同极性空间电荷效应将会导致电缆在极性反转或电压撤去过程中局部场强倍增而发生击穿^[4].文献^[2]指出,电压极性反转过程中局部场强将提高 50%~70%,在他们的实验中电压反转时间固定为 90 s.本文作者曾研究了不同电压反转时间(20~60 s)作用过程中聚乙烯试样在常温和温度梯度下最大瞬态场强的变化^[5],结果表明,温度梯度效应将加剧场强畸变.另外,直流电缆中温度梯度效应导致电荷积聚、传输特性的不同,必将造成极性反转过程中最大瞬态场强对反转极性的依赖性.

本文采用电声脉冲法空间电荷测量装置^[6],通过研究常温($\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)及温度梯度($\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)下不同极性电压作用 2 h 过程中电荷积聚对电极材料的依赖性,探讨了温度梯度场强下不同电压极性反转过程对聚乙烯内电荷积聚和最大瞬态电场的影响因素和作用机理.

1 试验方法

1.1 试样制备

本试验所使用的原料是大庆生产 18D 低密度聚乙烯,密度约为 0.917 g/cm^3 ,对试样原材料颗粒分别在 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的平板硫化机上热压制成板状试样,试样尺寸为 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$.

1.2 空间电荷测量

采用传统的电声脉冲法空间电荷测量系统,通过设计中空电极系统和引入高/低温循环浴,研制了适用于温度梯度场的空间电荷测量装置^[6],见图 1.为精确控制电压反转过程,本文高压直流电源由 RIGOL 任意波形发生器(100 MHz)和 TREK 公司高压电源放大器(30/20 A)组成.

1.3 电荷稳态分布特性

在正或负直流场强 50 MV/m 作用 2 h 后,分别在常温($\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)和温度梯度($\Delta T=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)下测量聚乙烯片状试样的空间电荷积聚和场强畸变特性.

1.4 不同极性反转过程

电压极性反转过程由任意波形发生器和高压电

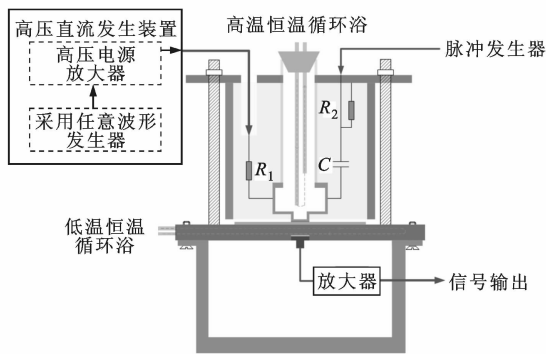


图 1 空间电荷测量系统示意图

源放大器精确控制,反转时间固定为 30 s.反转试验包括两部分内容:① -50 MV/m 直流预压 2 h 后,电压极性从负到正反转;② 50 MV/m 直流预压 2 h 后,电压极性从正到负反转.电压极性反转与加压过程如图 2 所示.

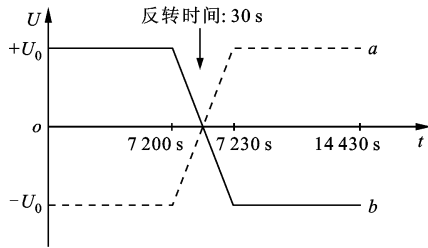


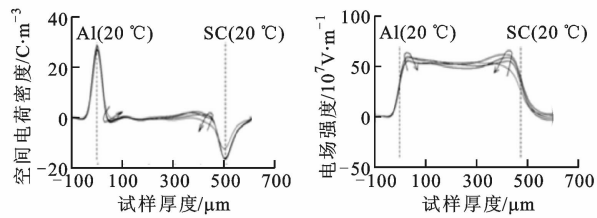
图 2 不同极性反转过程

2 试验结果

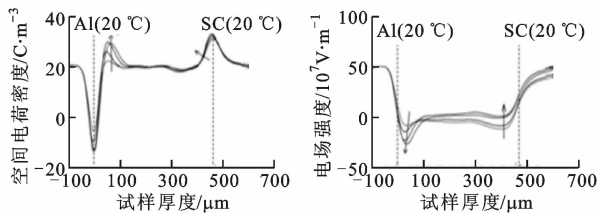
2.1 稳态时空电荷特性和场强分布

图 3 所示为常温($\Delta T=0\text{ }^{\circ}\text{C}$)下,聚乙烯片状试样在正或负 50 MV/m 直流电场分别作用 2 h 过程中的空间电荷特性和场强分布.当聚乙烯片状试样在正的直流电场作用下时,Al 电极为负,SC 电极为正,同理当聚乙烯片状试样在负直流电场作用下时,Al 电极为正,SC 电极为负.试样直接夹在 Al 电极和 SC 电极之间.箭头所示为加压过程中电荷密度或场强变化趋势.由图 3a 可见,负极性电压作用时电极附近首先出现异极性电荷,随后注入大量的同极性电荷,缓解了电极附近的场强畸变.当正极性电压作用时(见图 3b),仅在负电极附近出现大量的随极化时间延长逐渐增多的异极性正电荷,此异极性电荷导致了阴极附近的场强严重畸变,而阳极附近并未出现相应的异极性负电荷,这可能是由于此处的异极性负电荷与阳极注入的大量同极性正电荷发生复合作用所致.以上结果表明:半导体电极易于注

入电荷和空穴,而 Al 电极只易注入空穴.该现象与文献[7-9]所述一致.



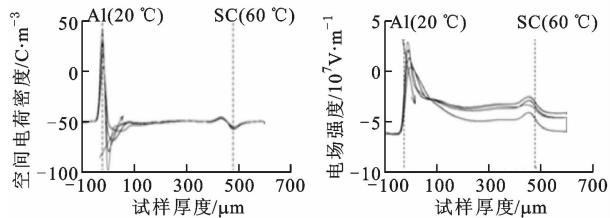
(a) 负压作用下空间电荷密度 (b) 负压作用下电场强度



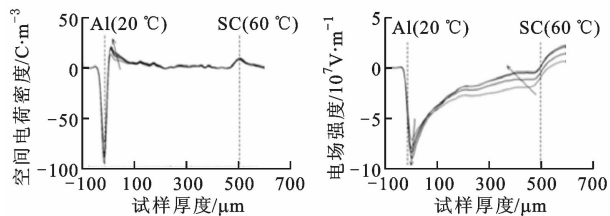
(c) 正压作用下空间电荷密度 (d) 正压作用下电场强度

图3 $\Delta T = 0^\circ C$ 时的试验结果

图4所示为 $\Delta T = 40^\circ C$ 下,聚乙烯片状试样在正或负 50 MV/m 直流电场分别作用 2 h 过程中的空间电荷特性和场强分布.图4中 Al 电极温度固定为 $20^\circ C$,SC 电极温度设为 $60^\circ C$.由图4可见,无论电压极性如何,高温侧电极大量的同极性电荷注入和迁移,导致了低温侧界面电荷的倍增,高温侧界面电荷的严重衰减,更加之绝缘电阻的负温度特性加剧了低温侧场强畸变现象^[3].值得注意的是,负极性电压作用过程中,Al 电极的空穴注入使得低温侧场强畸变逐渐得以缓解,而正极性电压作用时低温侧



(a) 负压作用下空间电荷密度 (b) 负压作用下电场强度



(c) 正压作用下空间电荷密度 (d) 正压作用下电场强度

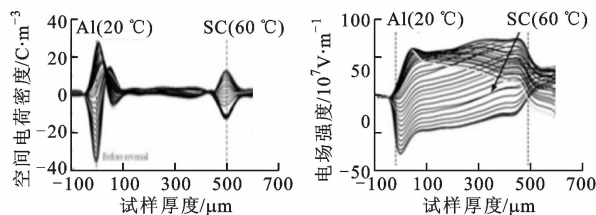
图4 $\Delta T = 40^\circ C$ 时的试验结果

场强畸变随着极化过程逐渐增强,这可能是由于正压作用下 SC 电极注入的空穴量远大于 Al 电极注入的电子量.同时由图4可见,负压作用时试样体内最大畸变由 120 MV/m 降到 80 MV/m,正压作用时体内最大畸变由 72 MV/m 增加到 90 MV/m.该结果再次表明,半导体电极易于注入空穴和电子,铝电极只易于注入空穴.

2.2 不同极性反转过程中电荷特性和场强分布

如上所述,电荷注入对电极材料的依赖性,导致了电压极性不同时电荷积聚和场强畸变特性的不同,也使得极性反转过程中的电荷积聚和场强畸变特性的不同.尤其在温度梯度场下,Al 电极附近的场强畸变更为严峻.

图5所示为 $\Delta T = 40^\circ C$ 下,50 MV/m 场强作用 2 h 后电压极性从正到负反转 30 s 过程的空间电荷及场强分布.由图5可见,电压极性反转前低温 Al 电极附近出现了许多异极性正电荷.这些正电荷可能来自于以下 3 个方面:①杂质粒子的电离;②高温 SC 电极同极性电荷的注入和迁移;③温度梯度分布导致电阻的梯度分布,进而使得电荷和场强呈梯度分布.当电压极性反转后,这些正电荷作为同极性电荷大大降低了 Al 电极的电荷积聚和场强畸变现象.随后,这些正电荷逐渐向 SC 电极移动,增强了 SC 电极附近的场强.同时,高温侧 SC 电极上大量的同极性负电荷注入逐渐削弱了 SC 电极附近的场强畸变.值得注意的是,在电压极性反转 30 s 过程中,Al 电极发生了明显的界面电荷移位现象,即反转前界面负电荷向左侧移向 Al 电极,反转后界面正电荷从试样内部向左侧移向界面.另外,随着极性反转后时间的延长,Al 电极附近的正电荷逐渐被高温 SC 电极注入的大量负电荷所复合.



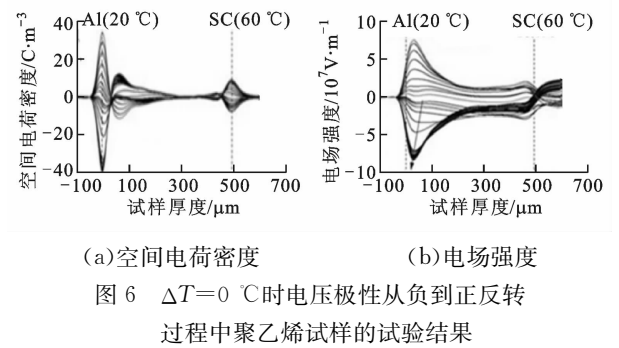
(a) 空间电荷密度

(b) 电场强度

图5 $\Delta T = 40^\circ C$ 时电压极性从正到负反转过程中聚乙烯试样的试验结果

图6所示为 $\Delta T = 40^\circ C$ 下,-50 MV/m 场强作用 2 h 后电压极性从负到正反转 30 s 过程的空间电荷及场强分布.由图6可见,电压极性反转前低温

Al 电极附近出现了许多异极性负电荷. 这些异极性负电荷也可能来源于上述 3 方面原因, 并且可能与 Al 电极注入的空穴发生相合作用. 众所周知, 空穴的迁移率远低于电子的迁移率^[10]. 这些具有快电荷迁移率的负电荷在极性反转过程中将迅速迁往 SC 电极, 结果 Al 电极附近显示出残留下的由 Al 电极注入的低迁移率的空穴. 因此, 这些注入的残留空穴大大增强了极性反转过程中(负到正)低温 Al 电极附近的场强. 随着极性反转后时间的延长, SC 电极注入大量的同极性正电荷使得 Al 电极附近的异极性电荷逐渐增多, 场强畸变更为严重. 值得注意的是, 在电压极性反转 30 s 过程中, Al 电极也发生了明显的界面电荷移位现象, 即反转前界面正电荷移向 Al 电极, 反转后界面负电荷从试样内部移向界面. 另外, 与图 5 不同, 当电压极性从负到正反转, 电荷-场强分布呈“镜像效应”, 如图 6 所示.



为了解极性反转过程中最大瞬态电场的变化, 我们根据图 5 和图 6 所示的场强分布特性, 得出极性反转过程中的最大瞬态电场特性, 如图 7 所示. 当电压极性从正到负反转过程中最大电场从稳态时的低温侧移向高温侧, 此现象表明电压极性从正到负反转过程中发生了“场强逆变”. 图 7 中曲线 3 为图 6(从负到正极性反转)中 Al 电极附近最大电场的变化, 当电压极性从负到正反转过程中未出现“场强逆变”现象.

本文定义试样内场强畸变因子 F 表示为极性反转过程中最大畸变场强相对于外施电场的增加或减少量的比率^[11], 即

$$F = \frac{E_{\max} - U_0/d}{U_0/d} \tag{1}$$

式中: $E_{\max}$ 为试样中出现的最大电场强度 (MV/m); U_0 为外施直流电压 (kV); d 为试样厚度 (mm).

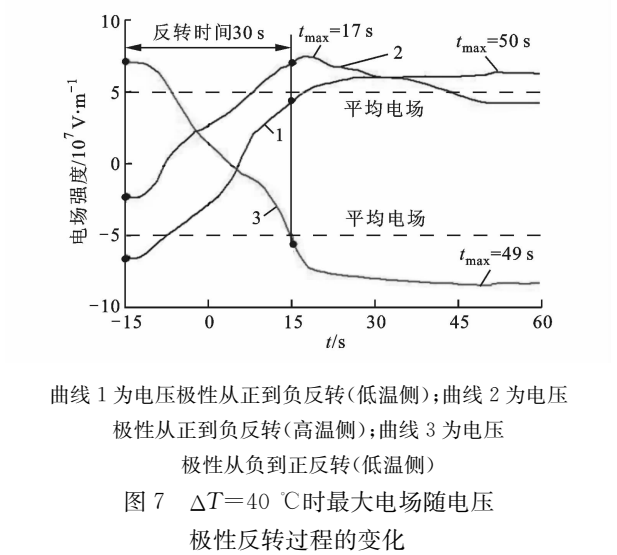
由式(1)可见, F 值越大, 表示试样内场强畸变越严重, 反之同理. 由图 7 可得出, 温度梯度下稳态时及不同极性反转过程中最大场强畸变因子, 如表

1 所示.

表 1 温度梯度下最大瞬态电场与反转极性的关系

电压极性反转	$F_{\text{steady}}/\%$	$F_{\text{max}}/\%$	t_{max}/s
正到负	80	50.0 (高温)	17
负到正	60	54.5 (低温)	49

注: F_{steady} 代表稳态时最大场强畸变因子; F_{max} 为电压极性反转过程中最大场强畸变因子; t_{max} 为达到最大瞬态场强所需要的时间, 计时起点选为电压极性的反转时刻.



由图 4 和表 1 可见, 稳态时正压下的最大场强畸变因子高于负压下的最大场强畸变因子, 这可能是由于 Al 电极易于注入空穴所致. 另外, 无论电压反转极性如何, 最大场强畸变因子基本相同. 但是, 当电压极性从正到负反转时, 达到最大瞬态畸变电场所需要的时间更短. 从正到负电压反转时, 最大瞬态电场出现在高温侧, 从负到正反转时, 最大瞬态电场出现在低温侧.

3 讨论

聚乙烯的导带宽度只有 0.1 eV, 在其禁带中存在大量的局域态, 在电场作用下, 正负电荷移动较小距离后, 掉入陷阱形成空间电荷. 在浅陷阱中的电荷可因为热运动而脱离陷阱继续在地场方向上移动, 形成异极性空间电荷. 在电极和介质界面、介质内部通过 Schottky 或 Poole-Frenkel 效应发射电荷, 在介质中形成同极性空间电荷^[10]. 一般来讲, 电缆击穿经常发生在电压撤去或电压极性反转时, 此时由于同极性空间电荷的存在, 使电极附近瞬间形成很高的局部反电场^[12].

本文作者曾研究了电压反转时间对温度梯度场下聚乙烯中空间电荷的影响,根据常温下聚乙烯中电荷注入与迁移模型^[13],得出了温度梯度场下电压极性从负到正反转过程中的电荷注入与迁移模型,并根据此模型讨论了极性反转时间对温度梯度下聚乙烯中最大瞬态电场的影响。模型如图8所示,详细内容参见文献[5]。图中空穴 p 表示阳极(低温侧)注入的空穴完全被阴极(高温侧)注入的电子掩盖或复合掉。左侧阳极为低温侧 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,右侧阴极为高温侧 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由图8可见,当电压从负到正反转过程中,阳极注入的空穴由同极性电荷变为异极性电荷,从而增强了反转后铝电极附近的电场。极性反转后,高温侧半导体电极注入大量的空穴,进一步加剧了低温侧Al电极附近的电荷积聚,场强畸变量逐渐增加,直到Al电极发生明显的同极性负电荷注入。因此,当电压极性从负到正反转时达到最大瞬态电场所需要的时间较长。

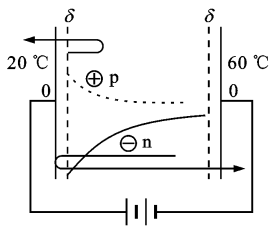


图8 温度梯度下从负到正极性反转时聚乙烯中电荷注入与迁移模型

根据以上模型,我们建立温度梯度下从正到负电压极性反转时聚乙烯中电荷注入与迁移模型,如图9所示。假设阴极注入的电子完全被阳极注入的大量空穴所掩盖或复合。当电压极性从正到负反转过程中,电子反电场移动,空穴沿电场移动。由于电子几乎被空穴复合,对外主要显示出空穴作用,而空穴的迁移率远低于电子,因此在极性反转过程中移动的距离较少。这也正是图5极性反转过程中Al电极附近正电荷衰减较慢的原因。当极性反转后,Al电极变为阳极,这些残余的空穴反而降低了Al电极附近的电场,同时在向高温半导体电极迁移过程中加强了半导体(反转后为阴极)附近电场,随着阴极的电子注入,高温侧的场强得以缓解,低温侧Al电极附近电荷逐渐由正变为负。所以如图5所示,从正到负极性反转过程中最大瞬态电场出现在高温侧,而且发生在极性反转完成的瞬间。表1中所示 t 为17 s而不是极性反转后的15 s,这可能是空间电荷测量系统在采集过程的信号延迟所致。极性反转

完成后,由于高温侧半导体电极大量注入电子,中和了体内空穴,逐渐在低温Al电极附近形成负电荷,从而使得高温侧场强逐渐降低,低温侧场强逐渐升高。

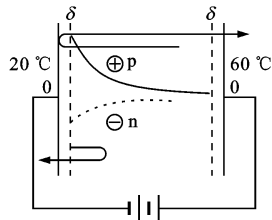


图9 温度梯度下从正到负极性反转时聚乙烯中电荷注入与迁移模型

4 结 论

本文通过测量室温和温度梯度下聚乙烯材料稳态时的电荷特性,研究了电压极性反转对温度梯度场下聚乙烯中空间电荷和瞬态电场的影响,得出如下结论。

(1)半导体电极易于注入空穴和电子,而Al电极仅易于注入空穴,因此稳态时聚乙烯在正极性电压作用下的最大场强高于负极性作用下的最大场强。

(2)温度梯度下电压极性从负到正反转时最大瞬态场强出现在低温侧,而电压极性从正到负反转时最大瞬态场强出现在高温侧。

(3)无论电极反转极性如何,温度梯度下极性反转过程中的最大瞬态场强畸变因子基本相同,但是当电压极性从正到负反转时达到最大瞬态电场所需要的时间更短。

参考文献:

- [1] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. HVDC cable design and space charge accumulation: part 3 [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(2): 5-14.
- [2] FU M, DISSADO L A, CHEN G, et al. Space charge formation and its modified electric field under applied voltage reversal and temperature gradient in XLPE cable[J]. IEEE Trans on DEI, 2008, 15(3): 851-860.
- [3] CHEN Xi, WANG Xia, WU Kai, et al. Space charge measurement in IDPE films under temperature gradient and dc stress[J]. IEEE Trans on DEI, 2010, 17(6): 1796-1805.
- [4] CHOO W, CHEN G, SWINGLER S G. Space charge

- accumulation under effects of temperature gradient and applied voltage reversal on solid dielectric dc cable[C] //2009 International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Piscataway, NJ, USA; IEEE, 2009; 946-949.
- [5] 陈曦,王霞,吴锴,等. 极性反转时间对聚乙烯中空间电荷及瞬态电场的影响[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(10): 91-96.
- CHEN Xi, WANG Xia, WU Kai, et al. Effect of voltage reverse times on space charge and transient field in PE under temperature gradient[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(10): 91-96.
- [6] 陈曦,王霞,吴锴,等. 聚乙烯绝缘中温度梯度效应对直流电场的畸变特性[J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(4): 62-65, 124.
- CHEN Xi, WANG Xia, WU Kai, et al. Effect of temperature gradient on the distortion of DC electrical field in polyethylene[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(4): 62-65, 124.
- [7] CHEN G, TAY T Y G, DAVIS A E, et al. Electrodes and charge injection in low-density polyethylene using the pulsed electroacoustic technique[J]. IEEE Trans on DEI, 2001, 8(6): 867-873.
- [8] HORI T, KANEKO K, MIZUTANI T et al. Space charge distribution in low-density polyethylene with blocking layer[C]//2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. New York, NY, USA; IEEE, 2003; 197-200.
- [9] MIZUTAI T, TANIGUCHI Y, HORI T, et al. Space charge dynamics of low-density polyethylene[C] //2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. New York, NY, USA; IEEE, 2002; 618-621.
- [10] 金维芳. 电介质物理学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 1997; 116-118.
- [11] PETER M, MARC J. Space charge measurement on impregnated paper; a review of the PEA method and a discussion of results[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1997, 13(3): 26-35.
- [12] 屠德民, 刘文斌, 庄国平, 等. 空间电荷自身反电场的介质击穿理论及电荷发射屏的研究[J]. 西安交通大学学报, 1987, 21(4): 1-11.
- TU Demin, LIU Wenbin, ZHUANG Guoping, et al. Theory of dielectric breakdown caused by space charge effects and study of the charge emission shield[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1987, 21(4): 1-11.
- [13] JONES J P, LIEWELLYN J P, LEWIS T J. The contribution of field-induced morphological change to the electrical aging and breakdown of polyethylene[J]. IEEE Trans on DEI, 2005, 12(5): 951-966.

(编辑 杜秀杰)